<학술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.11.1445** ISSN 1226-4873

플러그인형 소형 공기압 매니폴드 밸브의 수명 및 성능열화특성에 관한 연구§

강보식*†· 이충성*· 김형의*
*한국기계연구원

Life and Performance Degradation Characteristics for Small-Sized Plug-In Type Pneumatic Manifold Valves

Bo Sik Kang*†, Choong Sung Lee* and Hyoung Eui Kim*
* Korea Institute of Machinery & Materials

(Received May 24, 2011 ; Revised September 9, 2011 ; Accepted September 15, 2011)

Key Words: Pnuematic Valve(공기압 밸브), Solenoid Valve(전자 밸브), Life Test(수명시험), Reliability Assessment(신뢰성 평가), Weibull Distribution(와이블 분포)

초록 : 공기압 밸브는 자동화 시스템에 공급되는 공기를 제어하는 기능을 지닌 핵심부품으로 널리 사용되고 있다. 하지만 공기압 밸브가 고장이 발생하면 설치되는 시스템의 특성상 전체 시스템에 영향을 미쳐 막대한 손실을 야기 시킬 수 있다. 이로 인하여 최근 신뢰성에 대한 중요성 및 소비자의 요구수준이 날로 증대되고 있어 밸브의 수명을 예측하여 제품의 신뢰성을 확보하기 위한 수명분포, 수명열화 특성 등과 같은 연구가 널리 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 공기압 밸브의 수명예측을 위한 핵심요소인 모수 도출 및 제안을 위하여, 최근 널리 사용되고 있는 플러그인형 공기압 매니폴드 밸브의 척도모수 및 B_{10} 수명값을 완전데이터 수명관측 방법으로 측정하였으며, 수명분포 특성을 확인하기 위하여 상관계수값을 이용한 분포 적합성 검토와 주요성능 결정항목인 동적응답과 누설이 수명에 따라 열화되는 특성을 분석한 결과를 제시한다.

Abstract : Pneumatic valves are widely used parts that have the ability to control the air supplied to automation systems. However, if failure occurs in a pneumatic valve, it may affect the entire system and could lead to huge losses, depending on the characteristics of the system at the time of failure. Because of this significant risk and the level of consumer demand for reliability, there has been much study on ensuring the reliability of products by predicting valve lifetime distributions and degradation characteristics. In this paper, in order to determine the main factors useful for predicting the lifetime of a pneumatic valve, the scale parameter and B_{10} life time value of the widely used plug-in–type pneumatic manifold valves were measured using complete observational data on the valve lifetimes. And also the property of life distribution has been distribution-suitability-reviewed by correlation coefficients, the degradation characteristics of valve has been presented by the result of analysis through dynamic response time test and leakage test.

- 기호설명 -

β : 와이블 분포의 형상모수
η : 와이블 분포의 척도모수
B_{10} 수명: 전체 대상의 10 % 가 고장이 발생하는 시점의 수명

1. 서 론

공기압밸브는 최근 콤펙트화와 집적화 기술 요구로 인하여 소형 및 경량화로 개발되고 있으며, 공기압 구동기기의 특성의 주요소인 고속 응답성 및 고내구성 특성을 지니고 있어야 한다.

특히 소형 공기압 매니폴드 밸브에서 가장 많이 적용되는 플러그인형 소형 공기압 매니폴드 밸브는 콤펙트한 작은 사이즈 내에서 장시간 밸브 구동함으로써 스풀 씰(Spool seal)의 마모가 급속히

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2011. 5. 19.-20., 서울과기대) 발표논문임
† Corresponding Author, kbs668@kimm.re.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

일어나며, 이로 인하여 압축 공기의 누설 및 최저 작동 압력 초과 등이 발생하고 최종적으로 작동불능 등의 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상들로 인해 자동화 기기 및 반도체 장비 등 기계의 오작동을 발생시켜 시스템 전체에 막대한 손실을 입히고 있다. 이로 인하여 누설과 수명향상을 위한 플러그인형 소형 공기압 매니폴드 밸브의 신뢰성 문제에 대한 산업 현장에서의 관심이 날로 높아지고 있다.

본 연구에서는 반도체장비 등 자동화 설비에 사용되는 플러그인형 소형 공기압 매니폴드 밸브와 자동화 라인에 널리 사용되는 ISO 베이스 배관형 대형 공기압밸브 중 현재 산업현장에서 널리 사용되는 플러그인형 소형 공기압 매니폴드 밸브에 대하여 국제 규격에서 제시하는 시험 방법 및 수명시험을 통하여 얻어진 수명데이터를 바탕으로 공기압 매니폴드 밸브에 대한 수명추정과 주요성능 열화 항목인 누설특성과 동적응답특성을 비교 분석, 수명 예측을 위한 중요요소인 척도모수 및 B_{10} 수명값을 제안하고자 한다.

2. 시험방법 및 장치

본 논문의 연구대상인 소형 공기압 매니폴드 밸브의 성능시험 방법은 JIS, CETOP, ISO 규격에 명시된 기준에 따랐으며, 수명시험 조건은 ISO 19973-2 에서 제안하는 시험방법을 채택하여 시험하였다. 공기조건은 Table 1 와 같이 관리된 공기를 공급하였다.

성능시험의 세부적인 항목은 누설시험(Leakage measurement test), 최소 작동 압력시험(Measurement of shifting pressures test), 동적 응답시험(Dynamic response test), 유출 능력시험(Flow capability test), 수명 시험(Life test)으로 결정하였다. 성능 열화를 확인하기 위한 공기압 매니폴드 밸브의 작동특성 성능을 지배하는 대표성능 항목은 누설시험, 동적 응답시험으로 하였다.

Fig. 1 에 시험대상 샘플인 포트 사이즈 M6, 정격전압 DC 24V 인 소형 공기압 매니폴드 밸브를 나타내었다.

성능시험 항목 중 누설시험은 Fig 2 의 (a)와 같이 시험하게 되며, 공기압 매니폴드 밸브를 누설 측정기에 연결한 후, 3 분간 630 kPa 의 압력을 가한 상태에서 입력포트와 배기포트에서 누설을 측정하게 되며, 측정된 결과의 합이 10 mL/min 이하이어야 한다. Fig 2 의 (b)는 본 시험에 사용된 공기압 매니폴드 밸브의 성능시험 장치를 나타내었다.

Table 1 General test conditions

Parameter	**Value**	
Working pressure	630 kPa ± 30 kPa	
Air quality	Filtration – nominal filtration rating	5 μm
	Dryer – maximum pressure dewpoint	+3 ℃

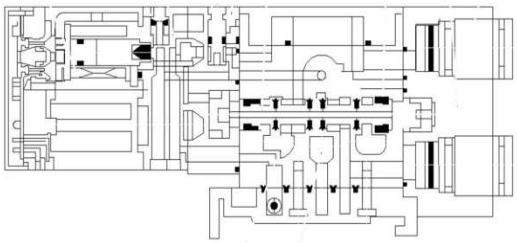
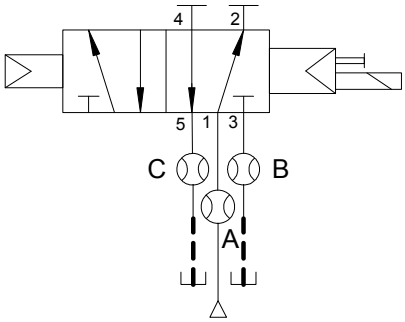


Fig. 1 Structure of pneumatic manifold valve

동적 응답시험은 Fig 3 의 (a)와 같이 시험하게 되며, 공기압 매니폴드 밸브의 입구 포트에 압력 630 kPa 를 가하고, 출구 포트에 압력 센서를 설치하고 유로는 차단하고, 밸브의 작동부인 솔레노이드에 정격 전압을 공급하고, 밸브의 출구 포트에서 압력 센서에서 압력이 검출되기까지의 시간을 측정하게 되며, 측정된 결과가 40ms 이내이어야 한다. Fig 3 의 (b)는 동적 응답시험 장치를 나타내었다.

밸브의 중요성능 열화 요소인 누설 특성을 확인하기 위하여 수명시험 진행 전의 초기 공기압 밸브와 750 만 Cycles, 1500 만 Cycles 작동 하였을 때 공기압 매니폴드 밸브의 누설과 동적 응답을 측정하였다.

Fig 4 의 (a)는 수명시험장비에 구성된 시험회로를 나타내며, 수명시험은 정격전압 및 입구포트에 630 kPa 의 압력을 인가하고 On/Off 타임을 각각 0.2 초씩 유지하도록 구성하였으며, 출구포트에 부하재현을 위해 내용적이 10mL 이하인 레저브를 설치한 상태로 공기압 매니폴드 밸브를 절환작동시켜 수명시험을 수행하였다. Fig 4 의 (b)는 수명 시험 장치를 나타내었다.



A : Input port
B, C : Output port

(a) Circuit of the leakage measurement test

(b) Equipment of the leakage measurement test

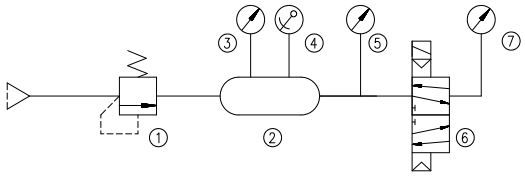
Fig. 2 Leakage measurement test

3. 시험 결과 및 고찰

Table 2,3 은 소형 공기압 매니폴드 밸브 시료 10 개(Sample 1~10)에 대한 성능시험 평가 항목 중 누설시험과 동적 응답 시험 결과를 나타낸 것이다.

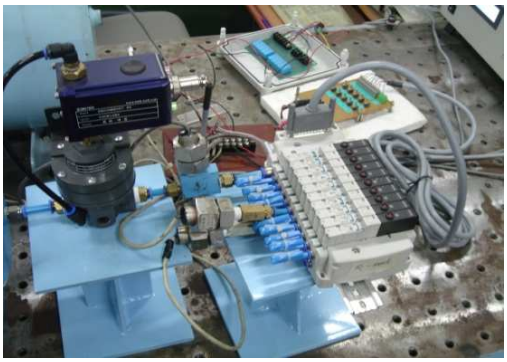
Table 2 의 누설 시험 결과를 보면 수명시험 전 누설 평균 값은 0.082mL/min, 수명시험 후 누설 평균 값은 5.615mL/min 으로 고장 판정 기준인 10mL/min 이하를 만족하지만 작동 횟수의 증가에 따라 누설량이 크게 변동하고 있음을 알 수 있으며, 밸브의 열화특성 변화를 확인 할 수 있다.

Fig 5 에는 밸브내 스풀에 장착된 씰의 수명시험 전후의 마모상태를 나타내었다. 수명 시험 후 분해된 씰의 마모가 심하게 이루어 진 것을 알 수 있으며, 스풀 씰의 마모가 누설에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 또한 씰의 표면 마모는 심각하게 진행된 상태이지만 씰의 영구 변형률은 두께 변화를 기준으로 약 3.0% 정도 수준으로, O-링 전체의 구경 변화율은 그리 크지 않음을 확인하였다.



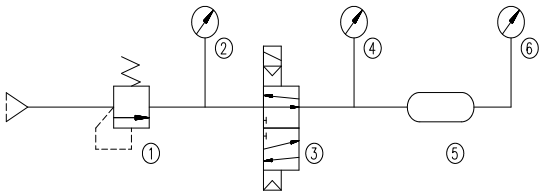
① Pressure control valve	⑤ Pressure sensor
② Air tank	⑥ Test valve
③ Pressure sensor	⑦ Pressure sensor
④ Temperature sensor	

(a) Circuit of the dynamic response test



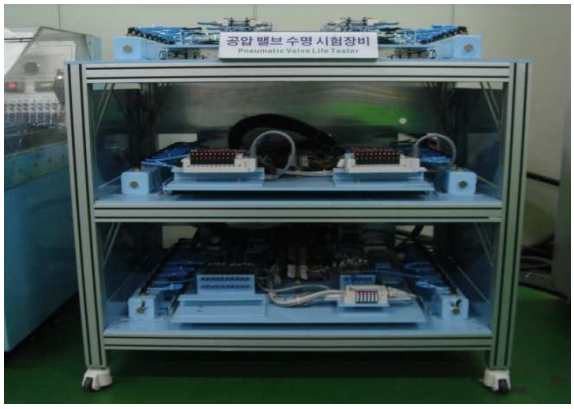
(b) Equipment of the dynamic response test

Fig. 3 Dynamic response test



① Pressure control valve	④ Pressure sensor
② Pressure sensor	⑤ Load volume
③ Test valve	⑥ Pressure sensor

(a) Circuit of life test



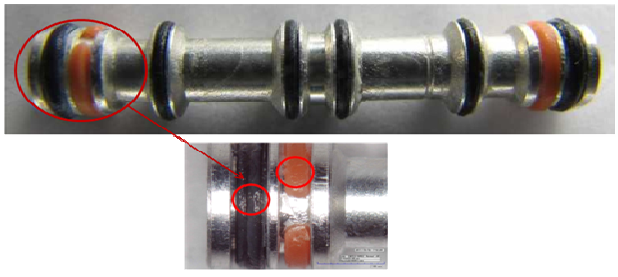
(b) The apparatus of life test

Fig. 4 Life test

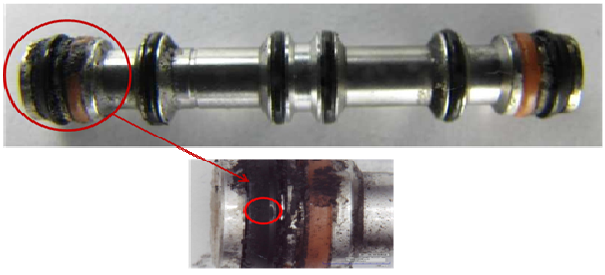
Fig 6 은 절환제어 기능을 가진 소형 공기압 매니폴드 밸브의 주요특성인 동적 응답시험의 수명시험 전과 수명시험 후 밸브 스풀 절환 특성인 동적응답시험 결과 그래프를 나타낸 것이며, Table 3 는 동적 응답 성능의 열화특성을나타내었다. 동적 응답시험 결과는 누설시험 열화특성 결과와 마찬가지로 판정 기준(기준 40ms 이하)에는 만족하지만 작동 횟수가 증가함에 따라 수명시험 전 동적 응답 평균 값은 10.27ms, 수명시험 후 동적 응답 평균 값은 23.26ms 로 동적 응답 성능이 크게 열화됨을 확인할 수 있다.

Table 2 Experimental result of leakage measurement

Section	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
0 Cycle	0.07	0.14	0.05	0.11	0.09
0.75 X 10^8 Cycles	2.78	3.96	1.24	2.58	1.74
1.5 X 10^8 Cycles	4.52	7.04	3.75	5.54	6.47
Section	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9	Sample 10
0 Cycle	0.05	0.09	0.15	0.04	0.03
0.75 X 10^8 Cycles	1.02	4.68	0.48	2.68	3.47
1.5 X 10^8 Cycles	5.78	7.53	4.06	5.99	5.47



(a) Before life test



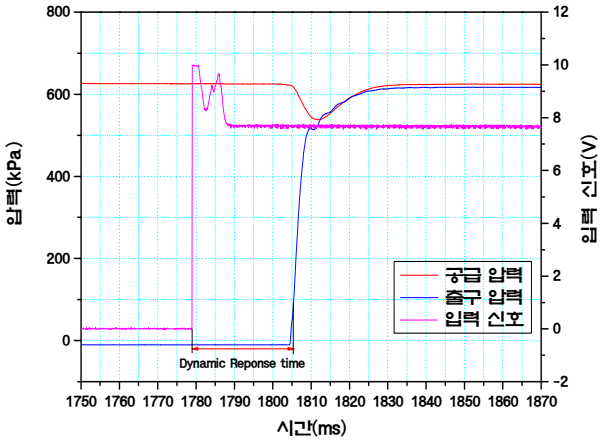
(b) After life test

Fig. 5 Abrasion state of spool seal

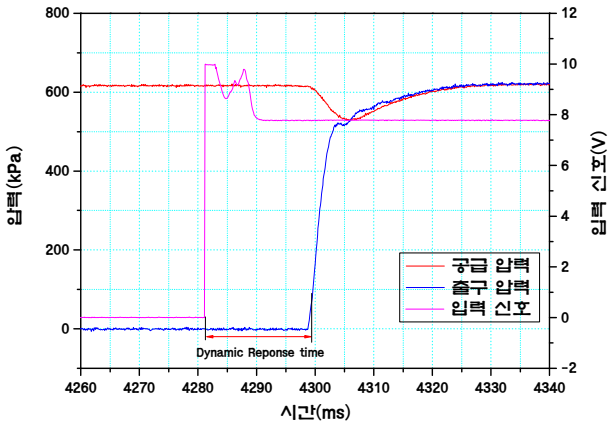
Table 4 는 시험대상품 1(Test product 1)과 동일사양의 다른 시험대상품 2(Test product 2)에 대하여 제조사별로 각각 5 개 시료(Sample 1~5)를

Table 3 Experimental result of dynamic responses

Section	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
0 Cycle	10.1	9.7	10.8	9.8	10.3
0.75 X 10^8 Cycles	12.3	11.9	11.9	12.6	13.7
1.5 X 10^8 Cycles	20.7	22.1	20.3	21.3	22.8
Section	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9	Sample 10
0 Cycle	9.9	11.2	10.4	9.8	10.7
0.75 X 10^8 Cycles	12.8	14.9	11.5	13.2	12.4
1.5 X 10^8 Cycles	21.6	25.4	22.9	27.4	28.1



(a) Life cycle[0 Cycle]



(b) Life cycles[1.5 X 10^8 Cycles]

Fig. 6 Experimental result of dynamic responses

Table 4 The operation cycles number of failure in life test

	Cycle number	
Test product 1	Sample 1	190,440,000
	Sample 2	163,930,000
	Sample 3	135,580,000
	Sample 4	170,130,000
	Sample 5	187,710,000
Test product 2	Sample 1	185,880,000
	Sample 2	124,260,000
	Sample 3	163,060,000
	Sample 4	164,920,000
	Sample 5	200,350,000

선정하여 수명시험을 수행한 결과를 나타내었다. 수명시험한 시료 모두 고장이 관측된 완전데이터이다. 시험대상품 1 밸브는 약 1.3 억만회 ~ 1 억 9 천만회 사이에 밸브 5 개가 고장이 났으며, 시험대상품 2 밸브는 약 1 억 2 천만회 ~ 2 억만회 사이에 밸브 5 개가 고장났다. 시험대상품 1 와 시험대상품 2 각각의 5 개 공기압 매니폴드 밸브의 주요고장형태는 절환작동시 다량의 누설로 인하여 고장이 발생하였다.

Table 4 에 정리된 수명데이터의 적합한 수명분포를 확인하기 위해 적합도 분석을 수행하였으며, 분포의 적합성을 나타내는 척도로 상관계수(Correlation coefficient) 값을 사용하였다. 동일한 수명데이터를 다수의 분포에 적용하였을 때 상관계수값이 1 에 가까울수록 해당분포에 적합함을 의미한다. 시험대상품 1 의 적합도 분석 결과를 Fig 7 에 나타내었다. 분석 결과 와이블 분포의 상관계수값 0.987 로 1 에 가장 근접하여 본 시험의 수명데이터는 와이블 분포가 가장 적합한 수명분포임을 알 수 있다. 시험대상품 2 의 적합도 분석 결과도 Fig 8 에 나타내었으며, 상관계수값이 0.975 로 같은 사양의 시험 대상품 1 과 같이 와이블 분포가 적합한 수명분포임을 확인하였다.

여기서 와이블 분포는 기계부품의 수명분포를 나타내는데 가장 적합한 확률 분포로 알려져

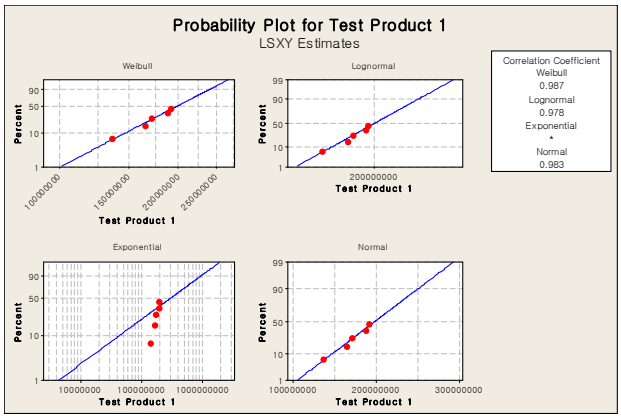


Fig. 7 Overview of weibull distribution[Test product 1]

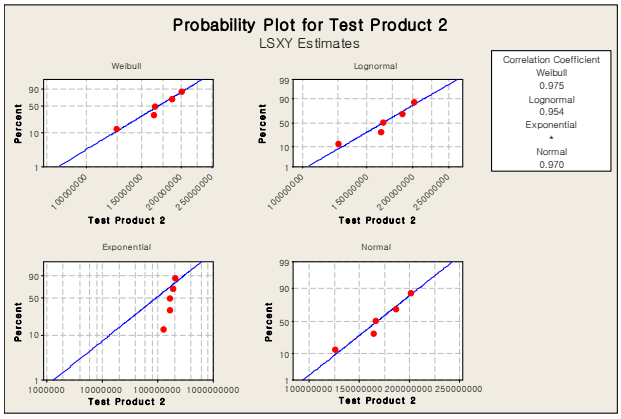


Fig. 8 Overview of weibull distribution[Test product 2]

있으며, 형상모수에 따라 증가형 고장률, 일정고장률, 감소형 고장률 등을 모두 표현할 수 있어 신뢰성데이터 분석에 가장 널리 사용된다.

또한 와이블 분포에 대한 적합도 검정을 명확히 하기 위해 수명 데이터는 Weibull++ 소프트웨어를 이용하여 Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정을 하였으며, 그 결과 시험 대상품 1 의 MOD KS test 값은 $P(D_{crit}<D) = 0.0000000306\%$, 시험 대상품 2 의 값은 $P(D_{crit}<D) = 0.0000801871\%$임을 확인하였으며, Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정값이 100%보다 적으므로 상관계수값을 사용한 분포 적합성 확인 결과와 같이 와이블 분포에 적합함을 알 수 있다.

Fig 9, 10 는 수명시험 중 고장이 발생한 각각 5 개의 시료에 대하여 확률 용지에 수명데이터를 타점하여 관측된 수명데이터를 분석 한 결과이다.

Fig 9 는 시험대상품 1 밸브의 수명시험 중 고장난 5 개 시료에 대한 와이블 확률지 도시결과를 바탕으로 와이블 분포의 모수를 추정한 결과 Table 5 와 같이 형상모수 β 는 6.18,

Table 5 Estimation value of reliability

	Estimated value
Shape parameter	6.18
Scale parameter	215,850,000 Cycles
MTTF	200,570,000 Cycles
B_{10} Life	149,950,000 Cycles

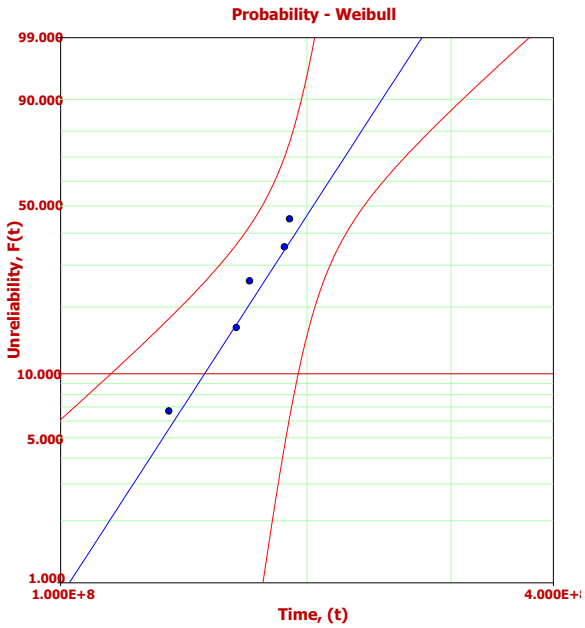


Fig. 9 Weibull probability paper analysis[Test product 1]

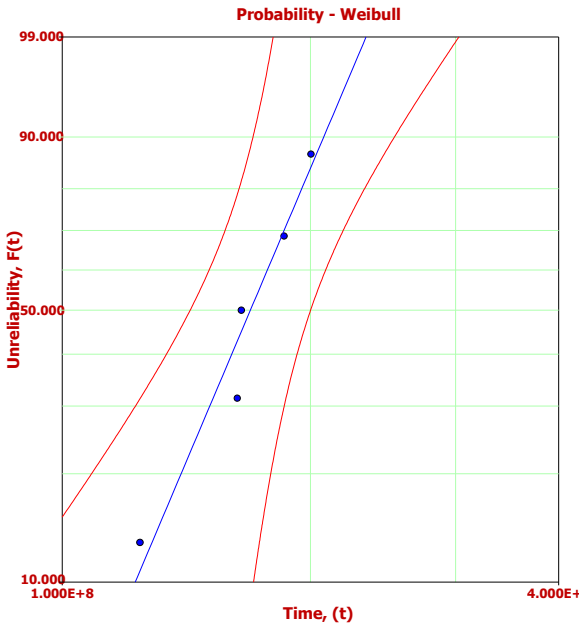


Fig. 10 Weibull probability paper analysis[Test product 2]

Table 6 Estimation value of reliability

	Estimated value
Shape parameter	5.849
Scale parameter	180,071,371 Cycles
MTTF	166,819,940 Cycles
B_{10} Life	122,564,991 Cycles

척도모수 η 는 215,850,000 Cycles 로 추정되었다. 또한, 평균수명 (MTTF)는 200,570,000 Cycles, B_{10} 수명은 149,950,000 Cycles 로 확인되었다.

Fig 10 는 시험대상품 2 밸브의 수명시험 중 고장난 5 개 시료에 대한 와이블 확률지 도시결과를 바탕으로 와이블 분포의 모수를 추정한 결과 Table 6 와 같이 형상모수 β 는 5.849, 척도모수 η 는 180,071,371 Cycles 로 추정되었다. 또한, 평균수명 (MTTF)는 166,819,940 Cycles, B_{10} 수명은 122,564,991 Cycles 로 확인되었다.

4. 결 론

(1) 본 연구에서는 공기압용 플러그인형 소형 공기압 매니폴드 밸브의 수명 분석을 통하여 신뢰성 수명시간 산출을 위해 매우 중요한 척도모수 및 B_{10} 수명값을 측정하였으며, 그 결과 형상모수 β 는 5.84 ~ 6.18, 척도모수 η 는 180,070,000 ~ 215,850,000 Cycles, B_{10} 수명은 122,560,000 ~ 149,950,000 Cycles 로 추정됨을 확인하였다.

(2) 소형 공기압 매니폴드 밸브의 수명분포 특성을 확인하기 위하여 상관계수값을 사용한 분포적합성 분석을 하였으며, 와이블 분포가 가장 적합한 분포임을 확인하였다. 더불어 와이블분포에 대한 적합도검정(Kolmogorov-Smirnov 방식) 결과, 본 공기압 매니폴드밸브의 수명분포는 상관계수값을 사용한 분포적합성 결과와 같이 와이블분포에 적합함을 확인하였다.

(3) 밸브의 수명 열화특성 분석결과, 밸브내 스풀씰의 왕복작동 횟수의 증가에 따라 스풀 씰 표면마모로 인한 누설특성과 동적응답 시간 지연 특성이 소형 공기압 매니폴드 밸브 열화 특성으로 나타낼 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

(1) ISO 19973-2, 2007, "Pneumatic Fluid Power-

Assessment of Component Reliability by Testing — Part 2: Directional Control Valves."
(2) Abernethy, R. B., 2003, "The New Weibull Handbook," *Florida*
(3) Kang, B.-s., Lee, S.-H., etc., 2007, “Life Analysis of Pneumatic Valve,” KSME